

杨滨娟,袁嘉欣,胡启良,等.长江中游典型稻田种植模式的资源利用率及综合效益[J].华中农业大学学报,2022,41(6):79-88.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.009

长江中游典型稻田种植模式的资源利用率及综合效益

杨滨娟,袁嘉欣,胡启良,刘宁,黄瑶,黄国勤

江西农业大学生态科学研究中心/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,南昌 330045

摘要 为探究长江中游稻田不同种植模式的综合效益,筛选适合长江中游地区利用的高效种植模式,选取紫云英-早稻-晚稻(CK,CRR)、紫云英-早稻-甘薯||晚大豆(CRI)、油菜-早稻-晚稻(RRR)、油菜-早稻-甘薯||晚大豆(RRI)和马铃薯-早稻-晚稻(PRR) 5种长江中游典型稻田种植模式,通过2018年9月至2020年12月连续的田间试验,比较长江中游典型种植模式的资源利用率和综合效益,结果显示:2 a间,各处理的年总光能利用率均高于对照处理,除2020年油菜-早稻-晚稻外,各处理的年总光能利用率显著高出对照处理10.98%~35.37%和22.22%~50.00%($P<0.05$)。2 a间,油菜-早稻-甘薯||晚大豆的周年光能生产效率和年总光能利用率较高,其次是紫云英-早稻-甘薯||晚大豆。2 a间,除CRI外,其余3个处理的周年积温生产效率均显著高出对照处理8.28%~25.44%(2019年)和21.09%~26.78%(2020年)($P<0.05$)。冬种紫云英处理(CRR,CRI)的年有效积温利用率均较高,处理CRI和处理CRR(紫云英-早稻-晚稻)表现较好,提高了积温利用率。连续2 a均是处理CRI的综合效益加权关联度最大,分别为0.75和0.81,综合效益最优。在综合考虑产量、温室气体排放、土壤质量、资源利用效率和综合效益的情况下,紫云英-早稻-甘薯||晚大豆模式表现较好。

关键词 种植模式;稻田;多熟制;资源利用率;综合效益

中图分类号 S344; S38 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0079-10

在农业生产中,充分合理地利用光、温、水、土等资源,是农业可持续发展的重要前提和保障。但近年来长江中游普遍存在种植制度单一,光、温、水资源利用率不足,过量施用化学肥料等一系列问题,严重影响了该区域的粮食生产结构和农业生态环境。发展多熟种植可以在时间和空间上高效集约化利用光、温、水、土等资源,可以获得更高的资源利用率^[1]。众多学者对多熟轮作种植模式的资源利用效率进行了大量研究。张帆等^[2]研究表明,马铃薯-双季稻的年总光能利用率显著高于其他模式,油菜-双季稻的年有效积温利用率显著高出其他模式3.45%~51.81%。龚松玲等^[3]研究表明,与早稻-晚稻种植模式相比,春玉米-晚稻和再生稻种植模式的光能生产效率、积温生产效率分别提高了16.5%和14.6%、15.1%和12.5%。Wang等^[4]研究表明,棉麦间作、棉麦连作模式与棉花单作模式相比,显著提高了作物生产力、光能利用率和辐射利用率。建立种植模式

综合评价指标体系可以评价种植模式的优劣,从不同层次、不同角度,得出客观、整体、全面和系统的结果^[5-6]。李鹏红等^[7]通过熵权法和灰色关联度法耦合,综合分析了旱地胡麻地膜利用的经济效益,结果表明,旧膜直播模式能提高旧膜利用率,提高经济效益。周海波等^[8]采用群决策方法,建立综合评价指标体系,对双季稻田三熟制不同种植模式的经济、生态和社会效益进行综合评价,结果表明,“绿肥-稻-稻”和“薯-稻-稻”是综合效益较好的2种模式。崔爱花等^[9]采用灰色关联度法,针对红壤旱地不同复种模式,综合评价了经济、生态和社会效益13个指标,发现混播绿肥(油菜×紫云英×肥田萝卜)复种模式的加权关联度最高,是兼顾经济、生态和社会效益的较优模式,适宜在红壤旱地推广。古翼瑞等^[10]通过AHP综合效益指数评价法围绕水稻相关种植模式的综合效益进行评价,结果显示,“春菜-中稻-秋马铃薯”模式综合效益排名最高、确保粮食高产量和高效

收稿日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(32160528);国家重点研发计划项目(2016YFD0300208);江西省现代农业产业体系—稻田综合种养产业技术体系(JXARS-12)

杨滨娟, E-mail: yangbinjuan@jxau.edu.cn

通信作者:黄国勤, E-mail: hgqjxes@sina.com

益。本研究选取长江中游典型多熟种植模式,分析冬季作物及其种植模式的光、温及土地等资源利用的特点,探究稻田不同种植模式的综合效益,以期筛选利用适合长江中游地区的高效种植模式提供理论支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年9月至2020年12月,在江西农业大学科技园水稻试验田(28°46'N、115°55'E)进行。

试验地属于亚热带季风性湿润气候,雨热同期、光照充足。年均太阳总辐射量为6 330.25 MJ/m²,年均≥0℃的日积温6 997.7℃,年均≥10℃的有效积温4 087.4℃,年均降水量1 921.4 mm。供试土壤为红黏土,试验田土壤基本化学性质:pH值5.22,有机质含量28.56 g/kg,全氮含量1.79 g/kg,碱解氮含量151.8 mg/kg,有效磷含量27.48 mg/kg,速效钾含量103.74 mg/kg。试验期间日平均气温与降水变化如图1所示。

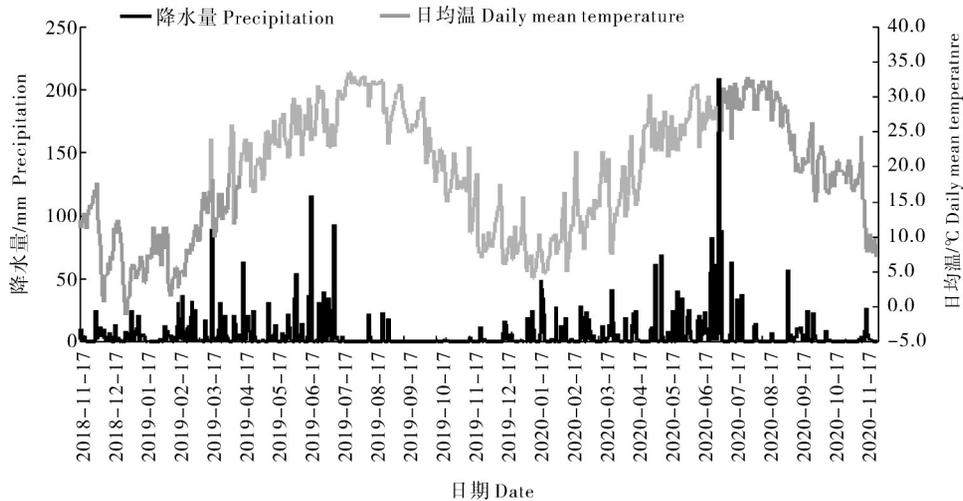


图1 试验期间日平均气温与降水量变化

Fig.1 Daily mean temperature and precipitation changes during the test period

1.2 试验设计

根据试验要求,设5个处理,每个处理3次重复,随机区组排列,共15个小区。以“紫云英-早稻-晚稻”为对照,另设置4个不同种植模式,每个试验小区面积为33 m²(11 m × 3 m),小区间用高30 cm的水泥埂隔开。具体试验处理为:紫云英-早稻-晚稻(CK, CRR);紫云英-早稻-甘薯||晚大豆(CRI);油菜-早稻-晚稻(RRR);油菜-早稻-甘薯||晚大豆(RRI);马铃薯-早稻-晚稻(PRR)。紫云英、油菜是均匀撒播,马铃薯切块浸种种植后覆盖稻草。紫云英播种量为37.5

kg/hm²,油菜播种量为15 kg/hm²,马铃薯种植密度为73 000株/hm²,并使用稻草覆盖。所有冬季作物均在水稻移栽前15 d翻压还田,冬季秸秆还田量见表1。甘薯大豆采用开沟起垄的方式种植,垄宽1.2 m,垄高0.35 m,每垄种4行大豆1行甘薯,甘薯两边各2行大豆,甘薯与大豆间行距0.3 m,甘薯株距0.25 m;大豆间行距0.2 m,株距0.2 m。水稻在移栽前25~30 d育秧,移栽时,水稻行距为0.2 m,株距为0.2 m。种植时间、施肥量及施肥方法详见表2,其他田间管理同一般大田试验。

表1 冬季作物秸秆还田量

Table 1 Quantity of crop straw mulching in winter

kg/hm²

处理 Treatments	作物 Crops	2019		2020	
		鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight
CRR(CK)	紫云英 Chinese milk vetch	31 527.9	6 107.53	33 528.87	6 405.92
CRI	紫云英 Chinese milk vetch	34 651.37	6 583.76	36 690.28	6 812.34
RRR	油菜 Rapeseed	20 611.89	5 173.58	23 148.61	5 902.90
RRI	油菜 Rapeseed	23 169.33	5 757.57	24 327.47	6 348.51
PRR	马铃薯 Potato	18 435.17	3 746.03	20 314.50	4 022.27

表2 田间管理
Table 2 Field management

作物 Crop	品种 Variety	种植日期-收获日期 Cropping date- Harvest date	种植方式 Cropping pattern	施肥量/(kg/hm ²) Fertilizing amount
紫云英 Chinese milk vetch	余江大叶籽 Yujiangdayezi	2018-09-30—2019-04-07 2019-09-30—2020-04-07	套播、撒播 Interplanting and sowing	钙镁磷肥 45 Calcium-magnesia phosphate fertilizer 45
油菜 Rapeseed	德油 558 Deyou 558	2018-11-08—2019-04-07 2019-11-06—2020-04-07	撒播 Sowing	N 63.75、P ₂ O ₅ 45、K ₂ O 225
马铃薯 Potato	东农 303 Dongnong 303	2018-11-26—2019-04-10 2019-11-28—2020-04-10	条播 Sowing in line	N 63.75、P ₂ O ₅ 45、K ₂ O 225
大豆 Soybean	奎鲜二号 Kuixian No.2	2019-08-01—2019-10-25 2020-08-18—2020-11-10	穴播 Hole sowing	N 150、P ₂ O ₅ 150、K ₂ O 375
甘薯 Sweet potato	广薯 87 Guangshu 7	2019-08-01—2019-10-31 2020-08-18—2020-11-17	条播 Sowing in line	N 80、P ₂ O ₅ 375、K ₂ O 80
早稻 Early rice	中嘉早 17 Zhongjiazao 17	2019-04-26—2019-07-24 2020-05-04—2020-07-30	移栽 Transplanting	N 180、P ₂ O ₅ 90、K ₂ O 120
晚稻 Late rice	天优华占 Tianyouhuazhan	2019-08-03—2019-10-30 2020-08-02—2020-12-03	移栽 Transplanting	N 180、P ₂ O ₅ 90、K ₂ O 120

1.3 植株干物质测定

在作物成熟期每小区按平均茎蘖法随机取5穴(小区边行不取),分成叶片、茎鞘和穗(抽穗后)等部分装袋,于105℃条件下杀青30min,再经80℃烘干至恒质量,用于测定各处理植株干物质积累与分配情况。

1.4 光、温及土地资源利用率

记录不同作物的播种(移栽)、收获或翻压时间(计算生育期),统计不同作物季的光、温资源量,其中光以总辐射量计算,温度以作物有效积温计算。以最早播种的冬季作物开始到次年晚稻收获为1周年(即本试验的2a时间为2018-09-30—2019-10-30和2019-09-30—2020-12-03),试验地2a的气象资料来自中国气象数据网。具体的光、温及土地资源利用率的计算公式参照文献[11-13]。各作物单位干物质燃烧产生的热量计算方法参照文献[14]。

1.5 综合效益分析

统计不同作物生产过程中的投入产出情况,计算不同种植模式的投入产出指标。采用灰色关联度法^[15],根据评价耕作制度^[5,8,16]的综合评价指标体系,选取经济效益(5个指标)、生态效益(5个指标)和社会效益(3个指标)共13个指标进行评估,并对各指标原始数据进行无量纲化^[17],采用极差正规化法^[14]计算各处理各指标的无量纲化值,并计算关联系数^[17]和加权关联度^[18]。具体计算公式见文献[15-18]。

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 处理数据,用 SPSS20.0 系统软件进行数据处理和统计分析,用

LSD 进行样本平均数的差异显著性比较,用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 稻田不同种植模式对资源利用效率的影响

1)各种种植模式光能生产效率及周年利用率。根据各作物单位干物质热量^[14],得出不同种植模式的光能生产效率与周年利用率(表3)。由表3可知,2019年,处理CRI、RRI晚稻季和周年的光能生产效率显著高出对照处理38.68%、29.25%和17.39%、24.64%($P<0.05$),处理RRR、PRR的周年光能生产效率显著高出对照处理13.04%、18.84%($P<0.05$)。2020年,除处理RRR外,处理CRI、RRI、PRR的早稻季和周年光能生产效率均显著高于对照($P<0.05$),增幅为1.08%~6.45%和19.05%~41.27%。处理CRI、RRI的晚稻季光能生产效率分别显著高出对照处理67.86%、55.95%($P<0.05$)。2019年,各处理的年总光能利用率显著高出对照处理10.98%~35.37%($P<0.05$)。2020年,除处理RRR外,其余3个处理的年总光能利用率均显著高于对照处理($P<0.05$),增幅为22.22%~50.00%。综合来看,2a间,处理CRI、RRI、RRR的周年光能生产效率和年总光能利用率较高,其中,处理RRI表现较好,光能生产效率和年总光能利用率最高;其次是处理CRI,紫云英生育期较长,在晚稻成熟期时与晚稻套播。冬种油菜、紫云英并水旱轮作能充分利用太阳辐射,提高辐射利用率。

表3 不同种植模式的光能生产效率与周年利用率

Table 3 Solar radiation production efficiency and annual use efficiency of different cropping systems

年份 Year	处理 Treatment	太阳辐射/(MJ/m ²) Solar radiation				光能生产效率/(g/MJ) Solar radiation production efficiency				年总光能 利用率/% Use efficiency of annual solar radiation
		冬作季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	周年 Rotation cycle	冬作季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	周年 Rotation cycle	
2019	CRR(CK)	2 272.8	1 667.2	1 796.8	5 736.8	0.27±0.02d	0.86±0.03ab	1.06±0.01b	0.69±0.02c	0.82±0.02d
	CRI	2 272.8	1 667.2	1 757.5	5 776.1	0.29±0.01cd	0.80±0.03bc	1.47±0.09a	0.81±0.02b	0.99±0.03b
	RRR	1 655.3	1 667.2	1 796.8	5 119.3	0.43±0.02b	0.75±0.02bc	1.11±0.02b	0.78±0.01b	0.98±0.01b
	RRI	1 655.3	1 667.2	1 757.5	5 080.1	0.49±0.01a	0.69±0.07c	1.37±0.07a	0.86±0.02a	1.11±0.02a
	PRR	1 515.8	1 667.2	1 796.8	4 979.8	0.31±0.01c	0.93±0.02a	1.15±0.05b	0.82±0.02ab	0.91±0.02c
2020	CRR(CK)	2 439.3	1 521.9	1 950.6	5 911.8	0.26±0.01d	0.93±0.04a	0.84±0.02b	0.63±0.01d	0.72±0.02c
	CRI	2 439.3	1 521.9	1 598.0	5 559.2	0.28±0.01d	0.99±0.07a	1.41±0.05a	0.80±0.03b	0.92±0.04b
	RRR	1 818.6	1 521.9	1 950.6	5 291.1	0.44±0.01b	0.85±0.04a	0.82±0.02b	0.70±0.01cd	0.88±0.01b
	RRI	1 818.6	1 521.9	1 598.0	4 938.5	0.49±0.00a	0.94±0.08a	1.31±0.06a	0.89±0.04a	1.08±0.05a
	PRR	1 626.9	1 521.9	1 950.6	5 099.4	0.32±0.01c	0.95±0.05a	0.90±0.03b	0.75±0.02bc	0.82±0.03bc

注:数据为3个重复的平均值±标准差;同列不同的字母分别表示差异达5%显著水平。下同。Note:Data is average ± SD of 3 replicates. The different letter in same column indicated significantly at 5% levels. The same as follows.

2) 积温生产效率及周年利用率。表4反映了稻田不同种植模式对有效积温生产效率和年有效积温利用率的影响。除处理CRI外,其余3个处理的周年积温生产效率均显著高出对照处理8.28%~25.44%(2019年)和21.09%~26.78%(2020年)($P<0.05$)。2019年,各处理冬作季的有效积温生产效率差异显著($P<0.05$),其中处理RRI达到最大。早稻季、晚稻季和周年均是处理PRR达到最大,且在周年时与其他处理间均差异显著,显著高出10.99%~34.46%

($P<0.05$)。2020年冬作季与2019年趋势一致。早稻季各处理的有效积温生产效率差异不显著($P>0.05$);晚稻季处理CRI、RRI的有效积温生产效率显著高于其他处理($P<0.05$);RRI的周年有效积温生产效率达到最大,且仅与对照处理差异显著($P<0.05$),高出26.30%。因此,马铃薯-早稻-晚稻和油菜-早稻-甘薯||晚大豆模式表现较好,提高了有效积温生产效率。

表4 不同种植模式的积温生产效率与周年利用率

Table 4 Growing degree days(GDD) production efficiency and annual use efficiency of different cropping systems

年份 Year	处理 Treatment	有效积温/°C GDD				≥10°C有效积温生产效率/(kg/(hm ² ·°C·d)) GDD production efficiency				年有效积温 利用率/% Use efficiency of annual GDD
		冬作季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	周年 Rotation cycle	冬作季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season	周年 Rotation cycle	
2019	CRR(CK)	628.2	1 371.2	1 498.6	3 498.0	/	5.51±0.18ab	6.79±0.09ab	5.07±0.10c	86.79
	CRI	628.2	1 371.2	1 513.7	3 531.1	/	5.03±0.17bc	6.48±0.40ab	4.73±0.12c	87.61
	RRR	264.9	1 371.2	1 498.6	3 134.7	7.86±0.04b	4.75±0.11bc	7.11±0.09a	5.73±0.07b	77.78
	RRI	264.9	1 371.2	1 513.7	3 149.8	9.93±0.15a	4.33±0.46c	5.94±0.32b	5.49±0.14b	78.15
	PRR	244.7	1 371.2	1 498.6	3 114.5	3.96±0.08c	5.90±0.14a	7.18±0.28a	6.36±0.13a	77.28
2020	CRR(CK)	818.6	1 500.5	1 513.5	3 832.6	/	4.98±0.22a	5.75±0.14b	4.22±0.11b	92.88
	CRI	818.6	1 500.5	1 082.9	3 402.0	/	5.22±0.33a	7.65±0.34a	4.74±0.23ab	82.45
	RRR	387.0	1 500.5	1 513.5	3 401.0	2.60±0.03c	4.45±0.21a	5.66±0.20b	5.11±0.08a	82.42
	RRI	387.0	1 500.5	1 082.9	2 970.4	6.70±0.10a	4.91±0.41a	7.28±0.34a	5.35±0.41a	71.99
	PRR	288.5	1 500.5	513.5	3 302.5	3.90±0.15b	5.04±0.23a	5.89±0.16b	5.33±0.15a	80.04

从年有效积温利用率来看,冬种紫云英处理(CRR、CRI)的年有效积温利用率均较高,其次是冬种油菜处理(RRR、RRI)。原因主要是紫云英在晚稻成熟期时与其套播,加之紫云英生育期较长,能利用的有效积温高,因此,处理CRI和处理CRR表现较好,提高了积温利用率。

3) 土地利用效率。由表5可知,2019年,CRI土地

利用率最高,其次是处理CRR,平均土地利用率达101.51%,处理RRR、RRI的土地利用率均在90%以上。2020年,处理CRR的土地利用率最高,处理CRI次之,平均土地利用率达105.76%,其余处理均在90%以上。综合2a数据来看,冬种紫云英处理(CRI、CRR)的土地利用率较高,其次是冬种油菜处理。

表5 不同种植模式的土地利用效率

Table 5 Land use efficiency of different cropping systems

年份 Year	处理 Treatment	生育期/d Growth period				周年 Rotation cycle	土地利用效率/% Land use efficiency
		冬作季 Winter crop season	早稻季 Early rice season	晚稻季 Late rice season			
2019	CRR(CK)	190	90	89	369	101.10	
	CRI	190	90	92	372	101.92	
	RRR	151	90	89	330	90.41	
	RRI	151	90	92	333	91.23	
	PRR	134	90	89	315	86.30	
2020	CRR(CK)	190	88	124	402	110.14	
	CRI	190	88	92	370	101.37	
	RRR	153	88	124	365	100.00	
	RRI	153	88	92	333	91.23	
	PRR	134	88	124	346	94.79	

2.2 稻田不同种植模式的综合效益分析

为分析比较稻田不同种植模式的综合效益,选取13个指标(表6)进行综合分析。由表6可知,2019年经济总产值、农业费用盈利率、光能利用率、积温利用率、耕地资源生产率、粮食产量均是处理CRI最高。纯收入、经济产投比、劳动净产值率均以处理PRR表现最好,而有机质增加比及温室气体增温潜势以处理RRI表现最好。2020年经济总产值、纯收入、农业费用盈利率、劳动净产值率、耕地资源生产率、粮食产量、粮食安全指数均以处理CRI表现最好,光能生产率、温室气体增温潜势以处理RRI表现最好,而处理PRR的经济产投比达到最大,处理CRR的积温生产率最大。

由于表6中的各指标量纲不统一,将指标进行无量化处理,得到稻田不同种植模式各指标的无量纲后的值(表7),求出不同模式各项指标的等权关联系数(表8)。为更客观地对稻田种植模式进行评价,本研究设置经济效益权重为0.5、生态效益权重为0.3、社会效益权重为0.2,使用加权关联度对各处理进行综合效益评价(表9)。

由表9可知,2019年各模式的经济效益值排序为PRR>CRI>RRI>CRR>RRR,生态效益排序为CRI>RRI>CRR>RRR>PRR,社会效益排序为

CRI>PRR>RRI>CRR>RRR。不同处理的综合效益加权关联度排序为CRI>PRR>RRI>CRR>PRR,处理CRI的加权关联度最大,表明此处理的综合效益最高。2020年各模式的单项效益指数:经济效益表现为CRI>PRR>RRI>CRR>RRR,生态效益表现为CRI>RRI>CRR>RRR>PRR,社会效益为CRI>RRI>PRR>CRR>RRR。不同处理的综合效益加权关联度排序为CRI>RRI>PRR>CRR>PRR,依旧是处理CRI的加权关联度最大,表明处理CRI的综合效益最高,能够兼顾经济、生态、社会三大效益,是能够推动稻田高产高效种植的较优模式。综合2a试验结果,紫云英-早稻-甘薯||晚大豆模式的综合效益最优。

3 讨论

研究表明,多熟种植模式比冬闲单作模式能提高资源利用率,麦稻模式和油稻模式的积温利用率、辐射利用率和土地利用效率与冬闲对照模式相比均处于较高水平,其中麦稻模式表现最优,分别达到94.2%、95.5%和86.3%^[19]。Zhang等^[20]研究结果表明,与不施氮肥相比,减氮、减氮+交替灌溉、减氮+有机肥模式均能提高粮食产量和资源利用效率。本试验各模式中,处理RRI的周年光能生产效率和年

表6 稻田不同种植模式的综合效益评价指标初始值

Table 6 Raw data of comprehensive benefits evaluation indexes of different cropping patterns in paddy field

年份 Year	效益评价指标 Benefits evaluation indexes	模式 Pattern				
		CRR(CK)	CRI	RRR	RRI	PRR
2019	I ₁ 经济总产值/(元/hm ²) Gross economic output	46 114.28	53 677.79	44 622.38	49 111.28	49 010.81
	I ₂ 总成本/(元/hm ²) Total cost	22 167.28	27 697.64	21 897.28	28 124.94	22 057.28
	I ₃ 纯收入/(元/hm ²) Net income	24 446.20	25 888.00	23 164.30	21 531.49	27 392.73
	I ₄ 经济产投比 Output input ratio	2.13	1.93	2.08	1.78	2.27
	I ₅ 农业费用盈利率/% Profit rate of agricultural expenses	615.16	716.06	595.26	655.14	653.80
	I ₆ 光能利用率/% Light energy utilization	0.82	0.99	0.98	1.11	0.91
	I ₇ 有效积温利用率/% Effective accumulated temperature utilization	86.79	87.61	77.78	78.15	77.28
	I ₈ 有机质增加比/% Organic matter increase	1.13	14.86	13.30	22.34	-0.45
	I ₉ 温室气体全球增温潜势/(kg/hm ²) Global warming potential of greenhouse gases	12 609.21	3 345.46	8 503.73	2 314.04	5 687.17
	I ₁₀ 耕地资源生产率/% Cultivated land resource productivity	115.15	134.04	111.43	122.64	122.39
	I ₁₁ 粮食产量/(kg/hm ²) Grain yield	17 736.26	20 645.30	17 162.45	18 888.95	18 850.31
	I ₁₂ 劳动净产值率/% Labor net output rate	326.11	345.35	309.01	287.23	365.42
	I ₁₃ 粮食安全指数 Food security index	2.38	2.93	2.27	2.60	2.59
2020	I ₁ 经济总产值/(元/hm ²) Gross economic output	41 071.57	50 442.31	38 733.93	48 062.72	41 874.82
	I ₂ 总成本/(元/hm ²) Total cost	21 668.08	27 789.79	21 458.08	27 579.79	21 618.08
	I ₃ 纯收入/(元/hm ²) Net income	19 403.49	22 652.52	17 275.85	20 482.93	2 256.74
	I ₄ 经济产投比 Output input ratio	1.90	1.82	1.81	1.74	1.94
	I ₅ 农业费用盈利率/% Profit rate of agricultural expenses	547.89	672.90	516.71	641.16	558.61
	I ₆ 光能利用率/% Light energy utilization	0.72	0.92	0.88	1.08	0.82
	I ₇ 有效积温利用率/% Effective accumulated temperature utilization	92.88	82.45	82.42	71.99	80.04
	I ₈ 有机质增加比/% Organic matter increase	16.04	31.13	18.28	24.54	18.77
	I ₉ 温室气体全球增温潜势/(kg/hm ²) Global warming potential of greenhouse gases	13 356.48	6 687.17	9 935.31	3 530.34	7 258.85
	I ₁₀ 耕地资源生产率/% Cultivated land resource productivity	104.98	128.94	99.01	122.85	107.04
	I ₁₁ 粮食产量/(kg/hm ²) Grain yield	16 169.91	19 859.18	15 249.58	18 922.33	16 486.15
	I ₁₂ 劳动净产值率/% Labor net output rate	258.84	302.18	230.46	273.24	270.22
	I ₁₃ 粮食安全指数 Food security index	2.08	2.78	1.90	2.60	2.14

注:经济总产值为各处理的农作物产值相加值,不包含绿肥的经济产值。资金净产值率=劳动消耗/经济总产值;耕地资源生产率=某种植系统的作物单位面积产量/该作物单一种植的单位面积平均产量 $\times 100\%$,劳动净产值率=净产值/劳动消耗,单个劳动力价格为150元/d;粮食安全指数=(种植系统单位面积粮食产量-保证我国粮食安全所需耕地资源单位面积平均产量)/保证我国粮食安全所需耕地资源单位面积平均产量^[8];有机质增加比为各模式与试验前相比增长百分比;其他数据折算参照文献[14]。Note: Total economic output value is the sum of the crop output of each treatment, and the green manure is not included in the economic output value. The productivity of cultivated land resources = annual yield of crop/annual yield of the crop in monoculture $\times 100\%$. Net labor production rate = net production value/labor consumption, and the labor price is 150 yuan/d. Food security index = (food production per unit area of cropping system - average production per unit area of arable land resources required to ensure our food security)/average production per unit area of arable land resources required to ensure our food security. The results show that the increase ratio of organic matter is the ratio of the growth rate of each model compared with that before the experiment. Other data conversion refer to reference [14].

总光能利用率较高,其次是处理CRI,表明冬种油菜、紫云英并晚稻季水旱轮作模式能充分利用太阳辐射,对于光能的获取具有一定的优势,有利于周年生物量的提高。

Su等^[21]研究表明,选用生长期较长的玉米品种

可以有效地提高积温利用率。本试验结果表明,冬种紫云英模式的年有效积温利用率均较高,冬种油菜处理次之。原因主要是紫云英在晚稻成熟期撒播后生育期较长,获得的有效积温较多,提高了有效积温利用率。除处理CRI外,其余3个处理的周年积温

表7 稻田不同种植模式的综合效益评价的无量纲化值

Table 7 Dimensionless values of comprehensive benefits evaluation indexes of different cropping patterns in paddy field

年份 Year	效益评价指标 Benefits evaluation indexes	模式 Pattern				
		CRR(CK)	CRI	RRR	RRI	PRR
2019	I ₁	0.16	1.00	0.00	0.50	0.48
	I ₂	0.04	0.93	0.00	1.00	0.03
	I ₃	0.50	0.74	0.28	0.00	1.00
	I ₄	0.71	0.31	0.61	0.00	1.00
	I ₅	0.71	0.31	0.61	0.00	1.00
	I ₆	0.00	0.59	0.55	1.00	0.31
	I ₇	0.92	1.00	0.05	0.08	0.00
	I ₈	0.07	0.67	0.60	1.00	0.00
	I ₉	0.00	0.90	0.40	1.00	0.67
	I ₁₀	0.16	1.00	0.00	0.50	0.48
	I ₁₁	0.16	1.00	0.00	0.50	0.48
	I ₁₂	0.50	0.74	0.28	0.00	1.00
	I ₁₃	0.16	1.00	0.00	0.50	0.48
2020	I ₁	0.20	1.00	0.00	0.80	0.27
	I ₂	0.03	1.00	0.00	0.97	0.03
	I ₃	0.40	1.00	0.00	0.60	0.55
	I ₄	0.79	0.37	0.32	0.00	1.00
	I ₅	0.79	0.37	0.32	0.00	1.00
	I ₆	0.00	0.56	0.44	1.00	0.28
	I ₇	1.00	0.50	0.50	0.00	0.39
	I ₈	0.00	1.00	0.15	0.56	0.18
	I ₉	0.00	0.68	0.35	1.00	0.62
	I ₁₀	0.20	1.00	0.00	0.80	0.27
	I ₁₁	0.20	1.00	0.00	0.80	0.27
	I ₁₂	0.40	1.00	0.00	0.60	0.55
	I ₁₃	0.20	1.00	0.00	0.80	0.27

生产效率均显著高出对照处理 8.28%~25.44% (2019年)和 21.09%~26.78% (2020年) ($P < 0.05$), 其中以处理 PRR 和 RRI 表现较好, 主要是由于冬种油菜、马铃薯(经济作物)的产量较高。

为了更全面客观地评价农田生态系统, 反映各种种植模式对于农田生态系统的整体效益功能^[22], 本试验采用灰色关联度法对稻田不同种植模式进行经济效益、生态效益和社会效益的综合效益评价。由于不同种植模式总产量、种植成本、用工成本的差异较大, 所以, 经济效益差异较大。本试验结果表明, 稻田不同种植模式下, 处理 CRI 和 PRR 的经济效益表现较好, 主要是晚稻季时种植甘薯和晚大豆, 且冬种马铃薯有利于提升后茬双季稻的产量, 所以经济效益较高。处理 RRI 虽然周年产量较高, 但种子和肥料成本较高, 增加了成本投入, 所以经济效益低于处理 CRI 和 PRR。处理 CRI、RRI 的生态效益表现较

好, 主要是晚稻季种植旱作物温室气体增温潜势最小, 有利于温室气体减排, 且有机质增加比也较高, 有利于增加土壤肥力, 所以生态效益较好。综合 2 a 数据, 不同种植模式的综合效益均是处理 CRI 的加权关联度最大, 表明紫云英-早稻-甘薯||晚大豆模式的综合效益最高, 能够兼顾经济、生态、社会三大效益, 对长江中游地区的稻田种植模式优化具有重要意义, 有利于农业生产的可持续发展。

综上所述, 2 a 内, 油菜-早稻-甘薯||晚大豆模式的周年光能生产效率和年总光能利用率较高, 其次是紫云英-早稻-甘薯||晚大豆。冬种紫云英处理的年有效积温利用率均较高, 紫云英-早稻-甘薯||晚大豆和紫云英-早稻-晚稻模式表现较好, 提高了积温利用率。连续 2 a 均是紫云英-早稻-甘薯||晚大豆模式的综合效益加权关联度最大, 分别为 0.75 和 0.81, 综合效益最优。在综合考虑产量、温室气体排放、土壤质

表8 稻田不同种植模式综合效益评价指标的等权关联系数

Table 8 Correlation coefficients of comprehensive benefit evaluation indicators of different cropping patterns in paddy field

年份 Year	效益评价指标 Benefits evaluation indexes	模式 Pattern				
		CRR(CK)	CRI	RRR	RRI	PRR
2019	I ₁	0.374 5	1.000 0	0.333 3	0.497 9	0.492 4
	I ₂	0.343 3	0.879 3	0.333 3	1.000 0	0.339 1
	I ₃	0.498 6	0.660 7	0.409 4	0.333 3	1.000 0
	I ₄	0.636 5	0.420 2	0.564 5	0.333 3	1.000 0
	I ₅	0.636 5	0.420 2	0.564 5	0.333 3	1.000 0
	I ₆	0.333 3	0.547 2	0.527 3	1.000 0	0.420 3
	I ₇	0.863 0	1.000 0	0.344 4	0.353 2	0.333 3
	I ₈	0.349 5	0.603 7	0.557 8	1.000 0	0.333 3
	I ₉	0.333 3	0.833 1	0.454 0	1.000 0	0.604 1
	I ₁₀	0.374 5	1.000 0	0.333 3	0.497 9	0.492 4
	I ₁₁	0.374 5	1.000 0	0.333 3	0.497 9	0.492 4
	I ₁₂	0.498 6	0.660 7	0.409 4	0.333 3	1.000 0
	I ₁₃	0.374 5	1.000 0	0.333 3	0.497 9	0.492 4
2020	I ₁	0.3845	1.000 0	0.333 3	0.711 0	0.405 9
	I ₂	0.340 9	1.000 0	0.333 3	0.937 8	0.339 0
	I ₃	0.452 8	1.000 0	0.333 3	0.553 4	0.528 8
	I ₄	0.700 5	0.443 6	0.424 1	0.333 3	1.000 0
	I ₅	0.700 5	0.443 6	0.424 1	0.333 3	1.000 0
	I ₆	0.333 3	0.529 4	0.473 7	1.000 0	0.409 1
	I ₇	1.000 0	0.500 4	0.499 6	0.333 3	0.448 6
	I ₈	0.333 3	1.000 0	0.370 0	0.534 1	0.379 1
	I ₉	0.333 3	0.608 8	0.434 1	1.000 0	0.568 5
	I ₁₀	0.384 5	1.000 0	0.333 3	0.711 0	0.405 9
	I ₁₁	0.384 5	1.000 0	0.333 3	0.711 0	0.405 9
	I ₁₂	0.452 8	1.000 0	0.333 3	0.553 4	0.528 8
	I ₁₃	0.384 5	1.000 0	0.333 3	0.711 0	0.405 9

表9 不同种植模式的综合效益评价(2019—2020)

Table 9 Comprehensive benefits evaluation of different cropping patterns(2019—2020)

年份 Year	模式 Pattern	经济效益 Economic benefit	生态效益 Ecological benefit	社会效益 Social benefit	综合效益 Comprehensive benefits	综合效益排名 Comprehensive benefits rank
2019	CRR(CK)	0.250 3	0.135 0	0.083 6	0.468 9	4
	CRI	0.334 8	0.239 0	0.176 3	0.750 0	1
	RRR	0.221 7	0.133 3	0.072 0	0.427 0	5
	RRI	0.249 1	0.233 2	0.088 1	0.570 3	3
	PRR	0.386 1	0.132 1	0.134 0	0.652 1	2
2020	CRR(CK)	0.258 0	0.143 1	0.081 5	0.482 6	4
	CRI	0.388 3	0.217 3	0.200 0	0.805 7	1
	RRR	0.184 9	0.126 7	0.066 7	0.378 3	5
	RRI	0.287 2	0.216 1	0.131 6	0.634 9	2
	PRR	0.327 6	0.133 3	0.089 4	0.550 3	3

量、资源利用效率和综合效益的情况下,紫云英-早稻-甘薯||晚大豆模式表现较好,对长江中游地区稻田种植模式的优化具有重要意义。

参考文献 References

- [1] 陈阜,梁志杰,陈述泉.多熟制的发展前景[J].世界农业,1997(6):18-20.CHEN F,LIANG Z J,CHEN S Q.The development prospect of multiple cropping[J].The world's agriculture,1997,(6):18-20(in Chinese).
- [2] 张帆.冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):87-95.ZHANG F.Comparative study on resource utilization efficiency and economic benefits of winter crop-double cropping rice rotation system in Hunan Province[J].Journal of agricultural resources and environment,2021,38(1):87-95(in Chinese with English abstract).
- [3] 龚松玲,曹培,高珍珍,等.种植模式对南方作物产量及资源利用效率的影响[J].作物杂志,2021(1):68-73.GONG S L,CAO P,GAO Z Z,et al.Effects of cropping patterns on crop yield and resource utilization efficiency in Southern China[J].Crops,2021(1):68-73(in Chinese with English abstract).
- [4] WANG G P,LI Y B,HAN Y C,et al.Resource use efficiency in a cotton-wheat double-cropping system in the Yellow River Valley of China[J].Experimental agriculture,2020,56(3):422-439.
- [5] 黄国勤.中国耕作学[M].北京:新华出版社,2001.HUANG G Q.Chinese agronomy[M].Beijing:Xinhua Publishing House,2001(in Chinese).
- [6] 杨滨娟,黄国勤,陈洪俊,等.稻田复种轮作模式的生态经济效益综合评价[J].中国生态农业学报,2016,24(1):112-120.YANG B J,HUANG G Q,CHEN H J,et al.Comprehensive evaluation of eco-economic benefits of multi-crop rotation in paddy field systems[J].Chinese journal of eco-agriculture,2016,24(1):112-120(in Chinese with English abstract).
- [7] 李鹏红,吴兵,高玉红,等.覆膜种植模式对旱地胡麻经济效益的影响分析——基于熵权灰色关联耦合的综合评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(4):180-188.LI P H,WU B,GAO Y H,et al.Effect of plastic film mulching on economic benefit of oil flax in dryland: comprehensive evaluation based on entropy weight and grey correlation coupling[J].Journal of arid land resources and environment,2021,35(4):180-188(in Chinese with English abstract).
- [8] 周海波,付江凡,王长松,等.江西省双季稻田三熟制种植模式综合效益评价[J].江苏农业科学,2019,47(4):294-299.ZHOU H B,FU J F,WANG C S,et al.Comprehensive benefit evaluation of triple cropping system in double cropping rice field in Jiangxi Province[J].Jiangsu agricultural sciences,2019,47(4):294-299(in Chinese).
- [9] 崔爱花,周丽华,杨滨娟,等.红壤旱地不同复种方式的生态功能评价[J].应用生态学报,2017,28(2):456-464.CUI A H,ZHOU L H,YANG B J,et al.Ecological evaluation of different multiple cropping systems in red soil drylands[J].Chinese journal of applied ecology,2017,28(2):456-464(in Chinese with English abstract).
- [10] 古翼瑞.成都平原以水稻为核心的种植模式综合效益分析与评价[D].成都:四川农业大学,2016.GU Y R.The Chengdu plain with a core of rice planting pattern comprehensive benefit analysis and evaluation[D].Chengdu:Sichuan Agricultural University,2016(in Chinese with English abstract).
- [11] 李淑娅,田少阳,袁国印,等.长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J].作物学报,2015,41(10):1537-1547.LI S Y,TIAN S Y,YUAN G Y,et al.Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in Middle Reaches of Yangtze River[J].Acta agronomica sinica,2015,41(10):1537-1547(in Chinese with English abstract).
- [12] 王美云,任天志,赵明,等.双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J].作物学报,2007,33(8):1316-1323.WANG M Y,REN T Z,ZHAO M,et al.Matter production and resources use efficiency of double-cropping silage maize system[J].Acta agronomica sinica,2007,33(8):1316-1323(in Chinese with English abstract).
- [13] 侯连涛,江晓东,韩宾,等.不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(9):58-63.HOU L T,JIANG X D,HAN B,et al.Effects of different mulching treatments on the gas exchange parameters and water use efficiency of winter wheat[J].Transactions of the CSAE,2006,22(9):58-63(in Chinese with English abstract).
- [14] 骆世明.农业生态学[M].北京:中国农业出版社,2001.LUO S M.Agroecology[M].Beijing:China Agriculture Press,2001(in Chinese).
- [15] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.DENG J L.Basic method of grey system[M].Wuhan:Hua-zhong University of Science and Technology Press,2005(in Chinese).
- [16] 黄国勤,钟树福,刘隆旺.鄱阳湖旱地耕作制度的模糊综合评判[J].耕作与栽培,1993(1):7-10.HUANG G Q,ZHONG S F,LIU L W.Fuzzy comprehensive evaluation of dryland farming system in Poyang Lake[J].Cultivation and cultivation,1993(1):7-10(in Chinese).
- [17] 张鹏,钟川,周泉,等.不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(8):1163-1171.ZHANG P,ZHONG C,ZHOU Q,et al.Effects of different winter planting patterns on carbon management index of paddy field[J].Chinese journal of eco-agriculture,2019,27(8):1163-1171(in Chinese with English abstract).
- [18] 黄国勤,熊云明,钱海燕,等.稻田轮作系统的生态学分析[J].土壤学报,2006,43(1):69-78.HUANG G Q,XIONG Y M,QIAN H Y,et al.Ecological analysis of crop rotation systems in paddy field[J].Acta pedologica sinica,2006,43(1):69-78(in Chinese with English abstract).
- [19] 于镇超.鄂中北两熟区不同种植模式资源利用效率评价[D].武汉:华中农业大学,2019.YU Z C.Evaluation on resource utilization efficiency of different cropping systems in double cropping area of north central Hubei Province[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).
- [20] ZHANG H,JING W J,ZHAO B H,et al.Alternative fertilizer and irrigation practices improve rice yield and resource use efficiency by regulating source-sink relationships[J].Field crops re-

- search, 2021, 265: 108-124.
- [21] SU Z E, LIU Z J, BAI F, et al. Cultivar selection can increase yield potential and resource use efficiency of spring maize to adapt to climate change in Northeast China[J]. *Journal of integrative agriculture*, 2021, 20(2): 371-382.
- [22] 王兰. 红壤旱地以玉米和大豆为主体的多熟种植模式优化研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018. WANG L. Research on optimized mode of multiple cropping pattern with corn and soybean as the subject in red soil dryland[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).

Comparative study on resource utilization and comprehensive benefit of typical rice planting patterns in middle reaches of Yangtze River

YANG Binjuan, YUAN Jiabin, HU Qiliang, LIU Ning, HUANG Yao, HUANG Guoqin

*Research Center on Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University/
Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic
Breeding of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China*

Abstract In order to explore the comprehensive benefits of different planting patterns in paddy fields in the middle reaches of the Yangtze River and screen the efficient planting patterns suitable for the middle reaches of the Yangtze River, five typical planting patterns in the middle reaches of the Yangtze River were selected. The resource utilization and comprehensive benefits of typical planting patterns in the middle reaches of the Yangtze River were compared through two consecutive years of field experiments. The results showed that in two years, the annual total light energy utilization rate of each treatments were higher than that of the control treatment, except the treatment RRR in 2020. The annual total light energy utilization rate of each treatments were significantly higher than that of the control treatment 10.98%-35.37% and 22.22%-50.00%. In two years, the anniversary of light energy and annual total light energy utilization efficiency under the treatment of RRI were higher, the second is treatment of CRI. During two years, the annual accumulated temperature production efficiency of the other three treatments were significantly higher than that of the control 8.28%-25.44% (2019) and 21.09%-26.78% (2020), except for the treatment of CRI. The effective accumulated temperature of utilization rate under the models of winter milk vetch were higher, the treatments of CRI and CRR have good performance, improve the utilization rate of accumulated temperature. For consecutive two years, comprehensive benefit weighted correlation degree under the treatment of CRI was 0.75 and 0.81 respectively, the comprehensive benefit was optimal. To sum up, in consideration of high yield, low greenhouse gas emissions, high soil quality, high resource utilization efficiency and the most optimal comprehensive benefit, the model of Chinese milk vetch-early rice-sweet potato||late soybean had good performance, which played an important role in the optimization of paddy planting pattern in the middle reaches of the Yangtze River.

Keywords planting patterns; paddy field; multiple cropping; resource utilization efficiency; comprehensive benefit

(责任编辑:张志钰)